第 66 卷 第 6 期 原 子 核 物 理 评 论 Vol. 66, No. 6
2024 年 2 月 Nuclear Physics Review Feb., 2024

文章编号： 1007-4627(2024) 06-0066-08

中子诱发 d 产物的微分反应截面的测量

刘龙祥[1]，孙 康[2,3,4]，易 晗[2,3]，卢 飞[1]，王宏伟[1]，范功涛[1]，曹喜光[1]，张 岳[1]，张苏雅拉图[5]，王德鑫[5]，李鑫祥[6,4]，杨宇萱[7,6]，匡 攀[6,4]，胡新荣[6,4]，郝子锐[6,4]，金 晟[6,4]，陈开杰[8,6]，蒋 伟[2,3]，樊瑞睿[2,3,9]，李 强[2,3,9]，陈永浩[2,3]，谭志新[2,3]，李 样[2,3]

(1. 中国科学院上海高等研究院，上海 201210；
2. 中国科学院高能物理研究所，北京 100049；
3. 散裂中子源科学中心，东莞 523803；
4. 中国科学院大学，北京 100049；
5. 内蒙古民族大学核物理研究所，通辽 028000；
6. 中国科学院上海应用物理研究所，上海 201800；
7. 郑州大学物理与微电子学院，郑州 450001；
8. 上海科技大学，上海 200120；
9. 核探测与核电子学国家重点实验室，中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要：在中国散裂中子源反角白光终端，测量了中子能量为 33.9MeV $^{12}C(n,d)x$ 的角微分反应截面。利用轻带电粒子探测器阵列（LPDA）$\Delta E-E$ 望远镜系统，测量了在实验室坐标系下从 24.5° 到 155.5° $^{12}C(n,d)x$ 的角微分反应截面。实验结果能够很好的符合以前的实验结果。由于缺少实验数据，这项工作为相关数据库的评价及数据库研制提供了重要参考。

关键词： $^{12}C(n,d)x$ 反应；角微分反应截面；CSNS 反角白光中子源；轻带电粒子探测器阵列

中图分类号： O571.53 **文献标志码：** A **DOI：** 10.11804/NuclPhysRev.66.01.66

引言

碳是组成地球上有机生命体的基本和重要的元素。几十 MeV 能量的中子与碳反应产生的轻带电粒子可以提供关于核结构的重要信息，核反应模型需要这些角微分反应截面数据来检验，如 $^{12}C(n,lcp)$ 反应[1-2]。在这些 (n,lcp) 反应中，$^{12}C(n,d)x$ 是非常重要的，因为人体组织中有大量的碳元素组成，快中子治癌和宇宙射线诱发中子在人体组织中的剂量计算需要大量的这样的角微分截面数据[1,3-8]。

同时，带电粒子产生反应对核探测具有重要意义。以塑料闪烁体探测器等碳基中子探测器为例，在模拟探测器对快中子的响应时，需要 $^{12}C(n,d)x$ 反应的精确截面和微分截面[9]。Majerle 测量了 $^{12}C(n,d_0)^{11}B$ 的反应截面[10], Pillon 等测量了 $^{12}C(n,d_0)^{11}B$ 和 $^{12}C(n,d_1)^{11}B$ 的反应截面[11]。这两次测量都用到了金刚石探测器，这表明金刚石探测器的响应中有 D 产物反应的贡献。

但是，$^{12}C(n,d)x$ 的反应截面是相当小的，这就在测量中产生了许多困难[12]。到目前为止，已经有多次相关的测量了，其中大部分是在几十 MeV 中子能量范围[13]:McNaughton 等在 56MeV[9]、Subramanian 等从 27.4 到 60.7MeV[14]、Slypen 等从 29.5MeV 到 72.8MeV[12,15]、Nauchi 等在 64.5MeV 和 75.0MeV[16]、Bergenwall 等在 95.6MeV[2] 和 Tippawan 等在 95.6MeV[1] 的所有测量的目标都是 $^{12}C(n,d)x$ 反应的双微分反应截面, Young 等在 60.0MeV[17] 的目标主要是 $^{12}C(n,d)^{11}B$ 微分反应截面的测量。所有的这些 100MeV 以内测量都是在 $^{7}Li(p,n)$ 这种单能中子源进行的。以前的测量结果在趋势上一致, 但其中部分测量结果存在较大差异。例如，McNaughton 等在 56.0MeV[9] 的实验数据要比 Slypen 等在 55.3MeV[12] 的大。Brenner 等人利用核内级联（INCA）[18] 程序对双微分截面进行了理论计算，理论计算与实验结果存在一定差异[12]。因此，需要更多的测量，特别是使用白光中子源的测量，这可以提供系统性的研究。中国散裂中子源（CSNS）Back-n 白光中子源终端提供了宽能量范围的

收稿日期：2024-02-20； 修改日期：2024-02-20
基金项目：国家自然科学基金资助项目（11905274，11875311，11775290,U2032146, 11805212）; 内蒙古国家自然科学基金（2019JQ01）; 国家重点研究和发展项目（2016YFA0400502, 2018YFA0404404）;
作者简介：刘龙祥（1984.11），男，山东省五莲县，助理研究员，博士，粒子物理与原子核物理；E-mail: liulx@sari.ac.cn
通信作者：E-mail: sunkang@ihep.ac.cn
通信作者：E-mail: lufei@sari.ac.cn

中子，适用于测量中子引起的核反应数据[19]。崔增琪等已经做了部分角度和能量的测量，但他们使用的是相对截面测量法[20]。

在这项工作中，我们完成了中子能量 33.9MeV 的 $^{12}C(n,d)x$ 反应微分截面的测量。石墨靶用作 $^{12}C(n,d)x$ 反应的样品。轻带电粒子探测器阵列（LPDA) $\Delta E-E$ 望远镜系统被用于实验中，每一组探测器包括一个低压多丝正比室 (LPMWPC）(ΔE)、一个硅探测器 (ΔE 或者 E) 和一个 CsI 探测器 (E)，放置在前冲角方向相对于中子入射方向从 24.5° 到 91°，反方向从 89° 到 155.5°[20-25]。

1　实验装置

1.1　中子源

中国散裂中子源是以一束在快速循环同步加速器里的 1.6GeV 能量、100kW 功率的质子，以 25Hz 的频率轰击钨靶产生散裂中子的。此次测量在中国散裂中子源反角白光线站的 1 号终端进行[24]。反角白光中子束线提供了一个从 0.5eV 到 100MeV 能量范围很宽的中子源。从钨靶中发出的带电粒子被偏转磁铁清除，以防止干扰测量。质子束工作在双束团模式下，脉冲宽度 43ns，脉冲之间的间隔 410ns[26]。从散裂靶到样品之间的中子飞行通道的距离是 57.99m。中子束斑的直径是 20mm，中注量率是 1.6×10^6n/cm^2/s[27]。

1.2　样品

图1 是实验中使用的样品和样品支架的照片。有三个样品位置是用于测量的：一个是用于测量 $^{12}C(n,d)x$ 反应厚度为 2.219mg/cm^2 的天然石墨薄片（碳样品），一个是用于中子束流本底测量与碳样品一样的空靶支架，还有一个是用于探测器信号测试的 α 源。两个背对背的 ^{241}Am α 源，活度为 33kBq。所有的样品都安装在一个定制的具有四个样品位置的铝支架上。碳样品和空靶是两个直径 40mm 的孔，一个长方形的样品位置用于 α 源，还有一个样品位置没有使用。

1.3　探测器

测量 $^{12}C(n,D)x$ 反应截面使用的是 LPDA 探测器系统。图2(a) 是 LPDA 探测器放置在真空靶室里的照片，图2(b) 是实验中探测器的详细布局。在真空靶室中放置了 16 套 LPDA $\Delta E-E$ 望远镜系统。每一套探测器包括一个低压多丝正比室 (LPMWPC) 作为 ΔE 探测器，一个 300um 厚的硅 (Si-PIN) 探测器作为 E 或者 ΔE 探测器和一个 30mm 厚的 CsI 闪烁体作为 E 探测器。LPMWPC 具有一层 2um 厚的 PET 窗，工作在 20000Pa 和 690V 偏压。LPMWPC 产生的信号先经过一个电荷灵敏前放进行预

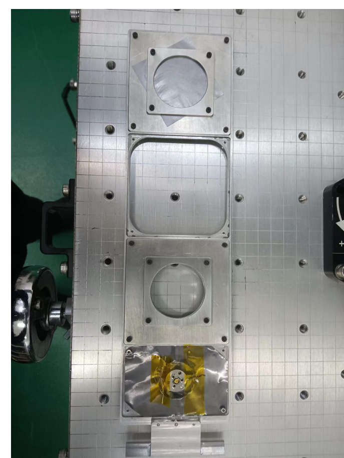


图 1　样品和样品支架

处理。Si-PIN 的信号经过放大器进行放大和预处理。CsI 探测器的信号由有硅光电倍增管 (SiPM) 进行放大，然后进入主放大器进行处理[28]。

望远镜探测器放置在相对于中子入射方向从 24.5° 到 155.5°。在角度 $\theta_L=24.5°,34.0°,...,91°$(标记为 L1,L2,...,L8) 的望远镜探测器，放置在中子束线的左边。另外 8 组望远镜探测器放置在束线的右边，角度分别为 $\theta_R=89°,98.5°,...,155.5°$(标记为 R1,R2,...,R8)。在这次测量中 R1、R4 和 R8 三组望远镜探测器没有正常工作。表格1中列出来每组探测器的中心离样品中心的距离。利用样品支架上的 ^{241}Am 源，对望远镜探测器进行了刻度。依据探测器的空间立体角和放射源的活度可以得到进入到探测器的 α 粒子的个数，由实验的刻度数据可以得到探测器探测到的 α 粒子的个数，探测到的粒子个数除以进入到探测器的粒子个数就是探测器的探测效率。利用 Geant4 模拟程序计算的每组望远镜探测器的空间立体角和平均探测角也列在了表1中 [29] 。模拟中考虑了由束斑尺寸引起的误差。在整个实验中样品平面相对于中子的入射方向的夹角是 30°。

1.4　实验过程

测量的总的束流时间是 202.3 小时，包括 191.9 小时石墨测量和 10.4 小时的空靶测量。因为这次实验主要是为了 $n-d$ 反应测量，空靶测量的是本底，所有石墨样品的测量时间要远远长于空靶的测量时间。^{241}Am 源主要用于监测实验前、实验中和实验后探测器和获取系统的工作状态。它一共测量了 5 次，总共 3.6 小时。另外，无束流本底测量了 20 小时。

1.5　数据获取系统

Back-n 的数据获取系统记录了望远镜探测器的波形二进制文件[30]。有三种类型的信号：LPMWPC 的信号，Si 探测器只经过前放处理的信号，CsI 探测器经硅光电

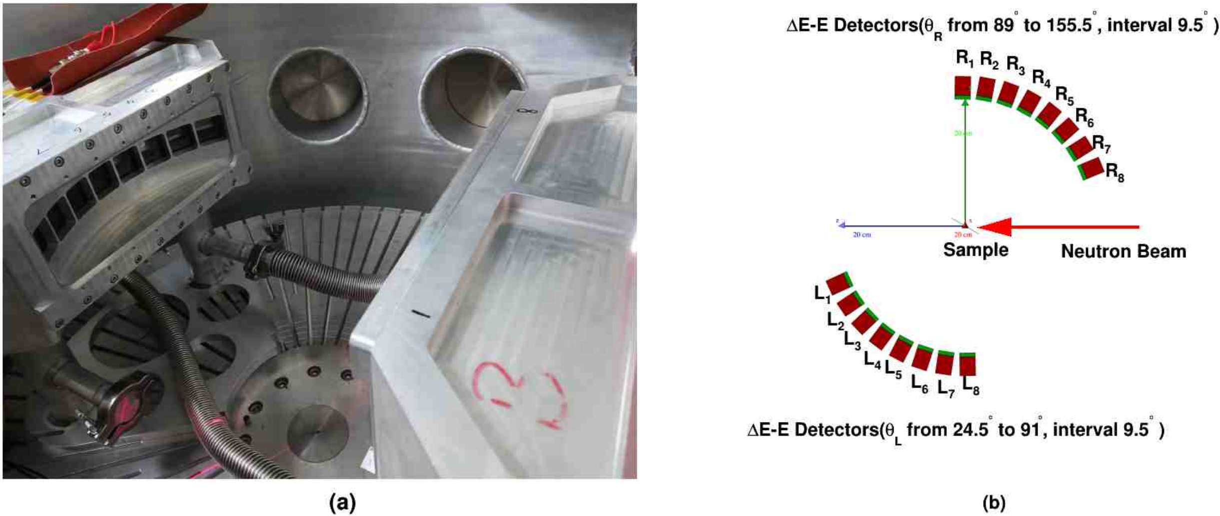


图 2 (a) LPDA 在真空靶室中的图片 (b) 探测器位置简图

表 1 LPDA $\Delta E - E$ 望远镜探测器的几何条件和探测效率

探测器组	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	R_2	R_3	R_5	R_6	R_7
探测角 (°)[a]	24.5	34	43.5	53	62.5	72	81.5	91	98.5	108	127	136.5	146
距离 (cm)[b]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
空间立体角 (0.01sr)[c]	1.15	1.26	1.24	1.22	1.21	1.23	1.22	1.20	1.24	1.24	1.26	1.23	1.24
探测效率	0.85	0.87	0.91	0.87	0.81	0.83	0.83	0.75	0.89	0.89	0.86	0.84	0.91

a: 利用 Geant4 模拟得到的每套望远镜的平均角度。b:LPDA 探测器中心到样品中心之间的距离。c: 用 Geant4 模拟计算得到的。

倍增管放大后经过主放放大的信号。

2 数据分析

通过处理记录信号的波形，选择和累计带本底事件和本底事件。空靶的本底事件是非常少的，可以忽略。带本底事件可以认为是净事件。双质子束团引起的卷积效应由迭代贝叶斯方法来分解开[31]。最终，我们就得到了 $^{12}C(n,d)x$ 的反应截面。

2.1 信号处理

所有的来自探测器的数字波形都由基于 ROOT 软件编写的多数字信号处理 (DSP) 网络来分析。经过处理后就得到了事件的幅度和时间。在这里，使用了一种简单的平滑和带通滤波算法将信号的波形转换成高斯分布的形状，以获得幅度信息[32-33]。通过信号波形的恒比甄别算法来获得事件的时间信息。图3是用于推导数字滤波算法的模拟滤波电路图。

2.2 用伽马爆时间确定中子飞行时间 (TOF)

通过 TOF 的方法确定每一个事件的中子能量。伽马爆产生于散裂过程，它的峰的位置一般被认为是伽马的飞行时间 T_γ。在 $\theta_L = 24.5°$ 的 Si-PIN 探测器和 CsI 探测器，它们伽马爆计数的 TOF 分布如图4 (a)、(b) 所示。, Si-PIN 探测器探测到的伽马爆事件的 TOF 分布都可以用双高斯分布来拟合，它们的标准偏差是 39ns。这个标准偏差主要是由质子脉冲宽度引起的。Si-PIN 探测器的事件分辨小于 10ns，数据获取系统的时间分辨小于 1ns。如果在同一组望远镜系统中的 CsI 探测器信号和 Si-PIN 探测器信号的到达时间的时间差在 700ns 以内，这些信号被认为是由相同的事件引起的。CsI 探测器的起始时间可以由符合事件的 Si-PIN 探测器和 CsI 探测器之间的时间差来校正。

中子飞行时间的计算公式如下所示：

$$TOF = T_d - (T_\gamma - \frac{L}{c}) \tag{1}$$

其中，T_d 是 d 事件的到达时间，L 是中子的飞行距离 57.99m)，c 是光速。中子的能量可以由它的 TOF 得到，应该考虑相对论效应。

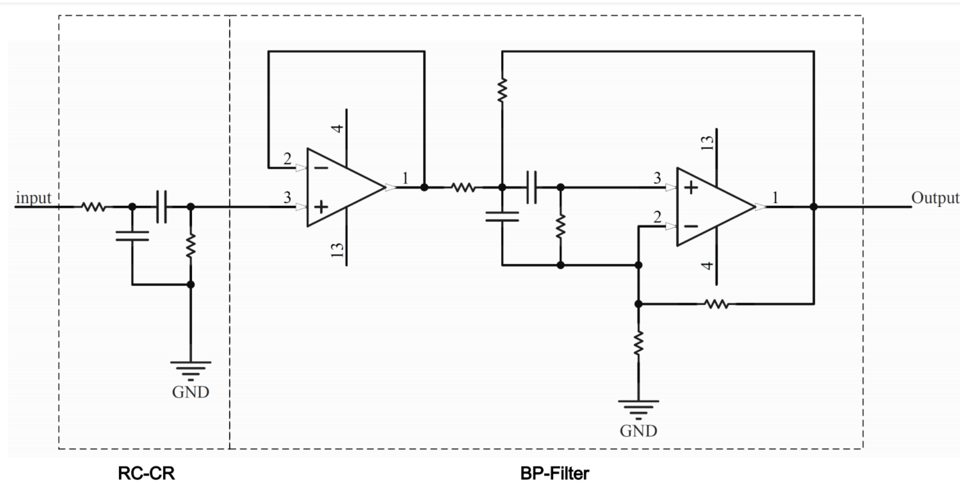


图 3　用于推导数字滤波算法的模拟滤波电路图

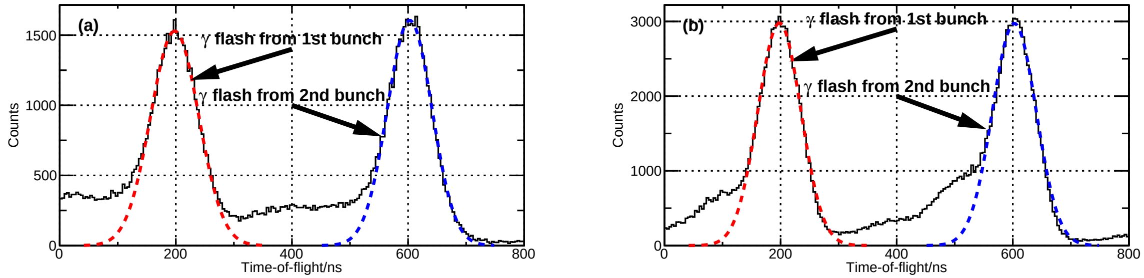


图 4　在 $\theta_L = 24.5^{\circ}$Si-PIN 探测到的 γ 爆 TOF 谱 (a) CsI 的谱 (b)（红色和蓝色虚线分别是对应与第一和第二质子束团的拟合曲线）

2.3　d 识别的 $\Delta E - E$ 谱

我们得到了十三套望远镜系统的 $\Delta E - E$ 谱用于识别碳样品和空靶的 d 事件。碳样品在 $\theta_L = 24.5^{\circ}$ 的 $\Delta E\!-\!E$ 信号幅度二维谱分布如图5所示。从空靶得到相同的二维谱几乎都是空的，这证明铝样品支架在中子束辐照下或者中子束本身没有带电粒子本底。

2.4　每个 TOF 道里的计数

在这篇文章中，中子 TOF 谱的每一道的道宽是 10ns。中子的能谱是等 LOG 道宽的，在这篇文章中 1MeV 到 1000MeV 有 300 道。减掉本底后，我们得到了每一 TOF 道和每一个探测角度的净事件数。通过记录带本底和本底测量中轰击钨靶的质子数量，作为本底扣除的归一化因子。

2.5　双束团 d 分布解谱

中子是由双质子束团产生的，两个束团之间的间隔是 410ns。这导致了中子能量的两种可能性，这两个值之间的差异随中子能量的增加而增大。一种迭代的贝叶斯算法被用来分解开双质子束团带来的卷积效应[31]。迭代算法的公式如下所示:

$$S_i^{(k+1)} = D_i \frac{S_i^{(k)}}{S_{i-\Delta}^{(k)} + S_i^{(k)}} + D_{i+\Delta} \frac{S_i^{(k)}}{S_i^{(k)} + S_{i+\Delta}^{(k)}} \tag{2}$$

其中，S_i 是单束团模式下每道的计数，D_i 是双束团模式下测量到的每道计数，Δ 是对应 410ns 间隔的道的数量 (Δ =410ns/w, w 是道的宽度，单位是 ns)，上表 (k) 指的是 k 次迭代。

在这篇文章中使用的解谱软件是由中国散裂源反角白光终端 (Back-n) 的工作人员开发[31]。它的算法是基于迭代贝叶斯方法，已经用实验数据进行了测试。

2.6　$^{12}C(n,d)x$ 的微分反应截面

由中子的能谱、在样品中 ^{12}C 核的数量和 Si-PIN 探测器的空间立体角，角微分反应截面 $\sigma_{E-bin,\theta}$ 可以用下面的公式进行计算:

$$\sigma_{E-bin,\theta} = \frac{N^d_{E-bin,\theta}}{\phi_{E-bin}\eta\Omega_\theta N_C} \tag{3}$$

其中，$N^d_{E-bin,\theta}$ 是净 d 事件的总计数，ϕ_{E-bin} 是中子的注量，中子注量的测量主要使用的是基于 $^{238}U(n,f)$ 反应的裂变电离室探测器[26]，η 是探测器效率，Ω_θ 是对应的

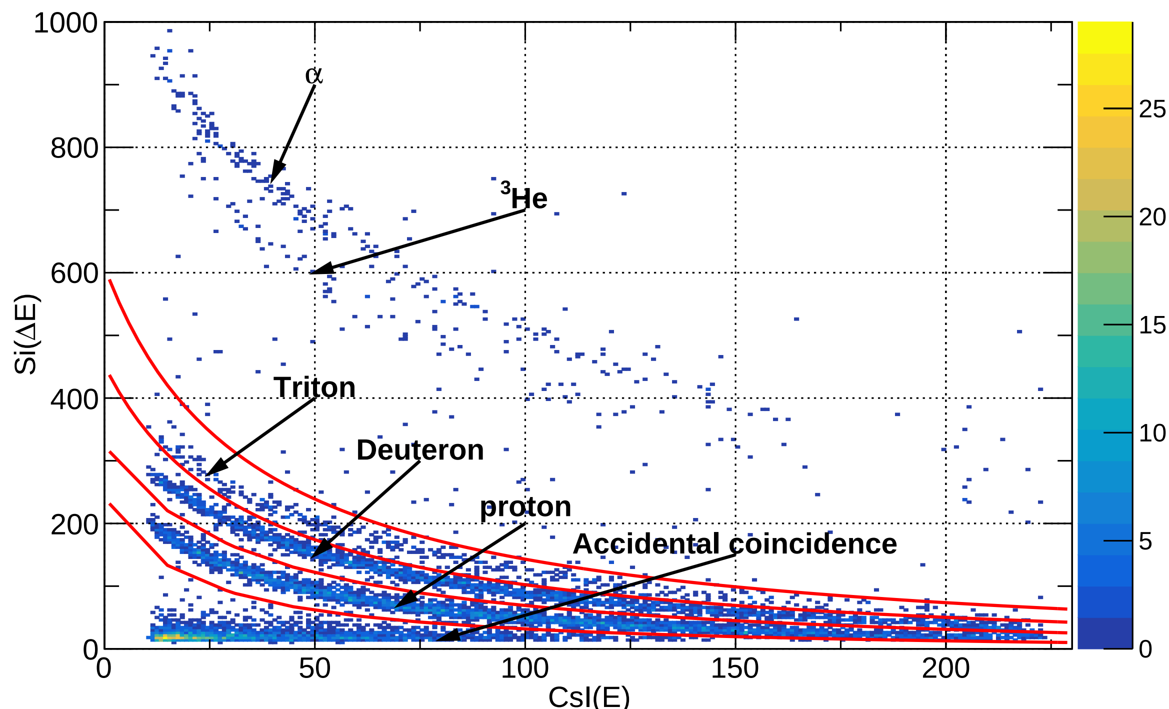


图 5　在 $\theta_L = 24.5°$ Si(ΔE)-CsI(E) 信号幅度 2-D 谱

Si-PIN 探测器的探测空间立体角,N_C 是 ^{12}C 原子核的数量。下标 $E-bin$ 和 θ 分别指的是中子的能量道和探测角度。表2列出了这篇文章中不确定度的来源和大小。

表 2　误差的来源

误差的来源	(%)
中子注量 (ϕ_{E-bin})	3^a
d ($N^d_{E-bin,\theta}$) 的 $\Delta E-E$ 识别	5.0-14.6
探测器空间立体角 Ω_θ	1.9
探测效率 η	3.0
N_C	1.1
双束团解谱 ($N^d_{E-bin,\theta}$)	3.0-8.1
总误差	7.5-17.4

a: 能量范围为 10 MeV ⩽ En ⩽ 50 MeV 的误差

3　结果和讨论

在这次实验中，测量的实验室坐标系下 $\theta_L = 24.5°$、34.0°、43.5°、53.0°、62.5°、72.0°、81.5°、91.0° 和 θ_R =98.5°、108.0°、127.0°、136.5°、146.0° 的 $^{12}C(n,d)x$ 的在中子能量 33.9MeV 微分反应截面如图 6所示。这次的结果与以前北京大学崔增琪等的测量结果进行了比较，在测量误差范围内符合的很好。崔增琪等使用的是相对截面测量法，相对于质子的反应截面，我们使用的是绝对截面测量法。由于统计量少的原因，在双束团 d 粒子时间分布的解谱过程中, d 粒子在探测器中的能量信息会丢失。这就造成了很难计算这个反应的 Q 值。

4　总结

在这篇文章中，我们在中国散裂中子源反角白光终端测量了 $^{12}C(n,d)x$ 反应在 13 个 θ 角度和中子能量为 33.9MeV 的微分反应截面。这次的测量结果与以前的测量结果在趋势和大小上大多数是符合的。这次的结果比以前的结果提供微分截面数据在角度范围上更宽。我们的其他能量点的数据还在进一步处理中。

参考文献

[1] TIPPAWAN U, POMP S, BLOMGREN J, et al. Phys Rev C, 2009, 79: 064611. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.79.064611.

[2] BERGENWALL B, ATAç A, KULLANDER S. Nuclear Physics A, 2005, 747(2): 152. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947404009212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.09.009.

[3] MEULDERS J, BENCK S, SLYPEN I, et al. Med Phys, 2000, 27(11): 2541. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11128307/. DOI: 10.1118/1.1319525.

[4] DANGTIP S, ATAç A, BERGENWALL B, et al. Nucl Instr and Meth A, 2000, 452(3): 484. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900200004551. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00455-1.

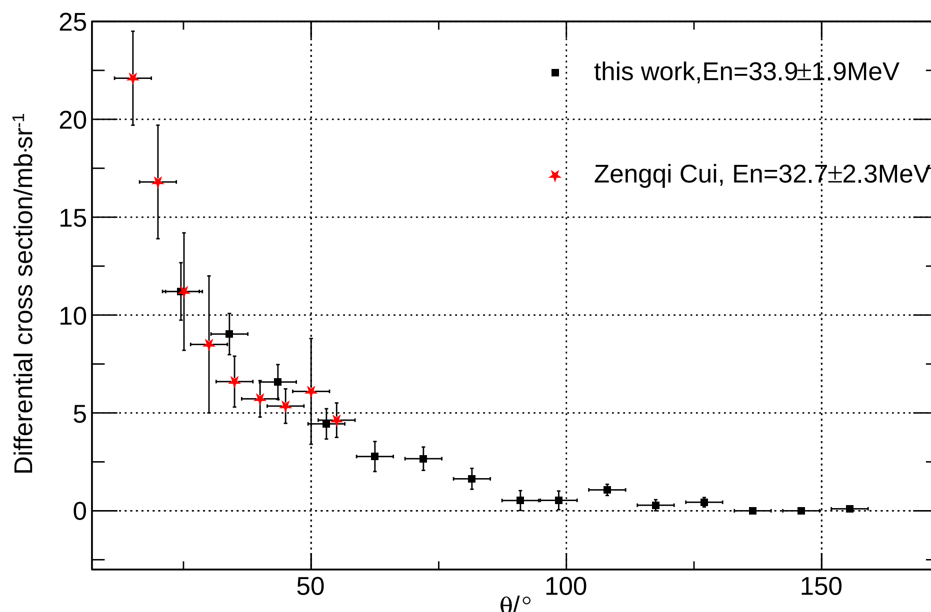


图 6　在中子能量为 33.9MeV 测量 $^{12}C(n,d)x$ 的的角微分反应截面与以前的测量结果的比较（只包括统计误差）

[5] J B, N O. Radiation Protection Dosimetry, 2003, 103(4): 293. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11128307/. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006146.

[6] J E, J B, GE L. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2001, 50(2): 449. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11380233/. DOI: 10.1016/s0360-3016(00)01586-8.

[7] MOFFITT G B, STEWART R D, SANDISON G A, et al. Physics in Medicine and Biology, 2018, 63(10): 105008. https://dx.doi.org/10.1088/1361-6560/aabd52.

[8] ROCKHILL J K, LARAMORE G E. Neutron radiotherapy[M]. Philadelphia: Elsevier, 2016.

[9] MCNAUGHTON M, KING N, BRADY F, et al. Nuclear Instruments and Methods, 1975, 130(2): 555. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X75900579. DOI: https://doi.org/10.1016/0029-554X(75)90057-9.

[10] MAJERLE M, ANGELONE M, KRáSA A, et al. Nucl Instr and Meth A, 2020, 951: 163014. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900219313828. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163014.

[11] PILLON M, ANGELONE M, FORREST R A. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2001, 461: 582.

[12] SLYPEN I, BENCK S, MEULDERS J, et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2000, 76(1): 26. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0092640X00908362. DOI: https://doi.org/10.1006/adnd.2000.0836.

[13] Experimental nuclear reaction data[EB/OL]. 2023. https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm.

[14] SUBRAMANIAN T S, ROMERO J L, BRADY F P, et al. Phys Rev C, 1983, 28: 521. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.28.521.

[15] SLYPEN I, CORCALCIUC V, MEULDERS J P. Phys Rev C, 1995, 51: 1303. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.51.1303.

[16] NAUCHI Y, BABA M, SANAMI T, et al. Journal of Nuclear Science and Technology, 1999, 36(2): 143. https://doi.org/10.1080/18811248.1999.9726192.

[17] J.C.YOUNG, F.P.BRADY, J.L.ROMERO. Bull Am PhysSoc, 1988, 33. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00942-X.

[18] BRENNER D J, PRAEL R E. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1989, 41: 71.

[19] JING H, TANG J, TANG H, et al. Nucl Instr and Meth A, 2010, 621(1): 91. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210012878. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.097.

[20] Cui Z, Jiang H, Jiang W, et al. European Physical Journal A, 2021, 57(11): 310. DOI: 10.1140/epja/s10050-021-00610-9.

[21] FAN R, JIANG H, JIANG W, et al. Nucl Instr and Meth A, 2020, 32: 164343. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220307403. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164343.

[22] JIANG W, BAI H, JIANG H, et al. Nucl Instr and Meth A, 2020, 973: 164126. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890022030526X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164126.

[23] JIANG H, JIANG W, BAI H, et al. Chin Phys C, 2019, 43(12): 124002. https://doi.org/10.1088/1674-1137/43/12/124002.

[24] BAI H, FAN R, JIANG H, et al. Chin Phys C, 2020, 44(1): 014003. https://doi.org/10.1088/1674-1137/44/1/014003.

[25] CUI Z, JIANG H, SUN K, et al. Chin Phys C, 2021, 45: 064001. https://doi.org/10.1088/1674-1137/45/6/064001. DOI: 10.1088/1674-1137/abf136.

[26] CHEN Y, LUAN G, BAO J, et al. The European Physical Journal A, 2019, 55: 1.

[27] AN Q, BAI H, BAO J, et al. Journal of Instrumentation, 2017, 12(07): P07022. https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/p07022.

[28] ERAERDS P, LEGRE M, ROCHAS A, et al. Opt Express, 2007, 15

(22): 14539. http://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-15-22-14539. DOI: 10.1364/OE.15.014539.

[29] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Nucl Instr and Meth A, 2003, 506(3): 250. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

[30] HE B, CAO P, ZHANG D L, et al. Chin Phys C, 2017, 41(1): 016104. https://doi.org/10.1088/1674-1137/41/1/016104.

[31] YI H, WANG T, LI Y, et al. Journal of Instrumentation, 2020, 15(03): P03026. https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/03/p03026.

[32] YI H. The research and test of multi-wire drift chamber system[D]. Tsinghua University, 2016.

[33] YI H, Lü L M, ZHANG Z, et al. Chin Phys C, 2016, 40(11): 116102. https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/11/116102.

Measurement of differential cross sections of neutron-induced d

Longxiang Liu[1], Kang Sun[2, 3, 4], Han Yi[2, 3], Fei Lu[1], Hongwei Wang[1], Gongtao Fan[1], Xiguang Cao[1], Yue Zhang[1], Suyalatu Zhang[5], Dexin Wang[5], Xinxiang Li[6, 4], Yuxuang Yang[7, 6], Pan Kuang[6, 4], Xinrong Hu[6, 4], Zirui Hao[6, 4], Sheng Jin[6, 4], Kaijie Chen[8, 6], Wei Jiang[2, 3], Ruirui Fan[2, 3, 9], Qiang Li[2, 3, 9], Yonghao Chen[2, 3], Zhixin Tan[2, 3], Yang Li[2, 3]

(1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210,China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
5. Institute of Nuclear Physics, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, China;
6. Shanghai Institute of Applied Pysicas,Chinese Academy of Sciences,Shanghai 201800, China;
7. School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
8. ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China;
9. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics,Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The angle-differential cross sections of neutron-induced d production from carbon were measured at neutron energies 33.9 MeV at China Spallation Neutron Source (CSNS) Back-n white neutron source. By employing the $\Delta E - E$ telescopes of the Light-charged Particle Detector Array (LPDA) system at 24.5° to 155.5° in the laboratory system, the angle-differential cross sections of the $^{12}C(n, d)x$ reactions were measured. The experimental results are in good agreement with the previous ones. The present work can provide a reference to the data library considering the lack of experimental data.

Key words: $^{12}C(n; d)x$ reactions；angle-differential cross sections；CSNS Back-n white neutron source；Light-charged Particle Detector Array；

Received date: 20 Feb. 2024;　**Revised date:** 20 Feb. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11905274，11875311，11775290,U2032146，11805212); the Natural Science Foundation of Inner Mongolia,China(2019JQ01)；the National Key Research and Development Program of China (2016YFA0400502, 2018YFA0404404)；

Corresponding author: Kang Sun, E-mail: sunkang@ihep.ac.cn

Corresponding author: Fei Lu, E-mail: lufei@sari.ac.cn